Статистический анализ аномалий критической частоты F2-слоя ионосферы по данным длительных рядов наблюдений обсерваторий Калининграда и Иркутска

Илья Хамов[1,2], Ольга П. Борчевкина[2], Федор С. Бессараб[2]

[1]Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия
[2]Калининградский филиал ИЗМИРАН им. Н. Пушкова, Калининград, Россия

Цель: выявить и сравнить аномальные отклонения foF2 в длительных рядах наблюдений, оценить их связь с геомагнитной активностью и региональные особенности отклика ионосферы.

1. Актуальность и объект исследования

Ионосфера влияет на КВ-радиосвязь, GPS и радиотехнические системы. Её ключевой диагностический параметр - критическая частота F2-слоя foF2. Аномалии foF2 отражают сильные отклонения от нормы и могут быть вызваны геомагнитными бурями, солнечной активностью или процессами из нижней атмосферы.

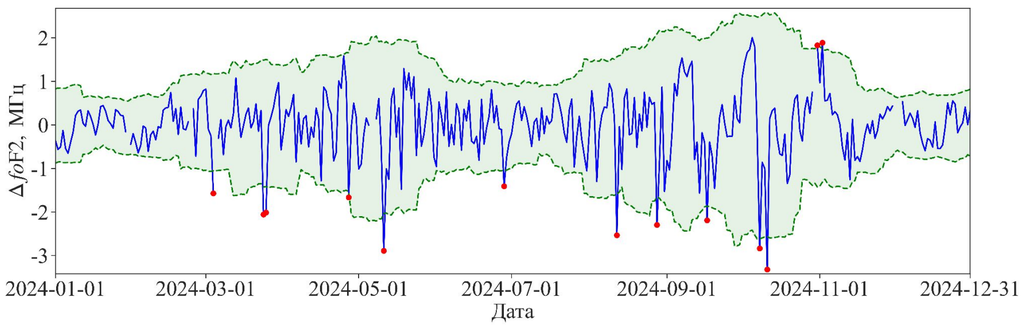
Однако выявление таких аномалий в многолетних рядах данных осложнено: ряды foF2 (Калининград, 1964–2024; Иркутск, 1955–2023) содержат пропуски, неоднородность форматов и регулярные вариации (суточные, сезонные, солнечные). Поэтому разработан устойчивый алгоритм выделения амплитудных аномалий (скользящее среднее 27 суток, порог 2σ, классификация по Dst и знаку отклонения). Затем выполнено сравнение результатов по данным двух обсерваторий для выявления общих закономерностей аномалий foF2.

Алгоритм выделения аномалий

1) Приведение данных двух станций к единому местному времени.
2) Усреднение до часовых и среднесуточных значений.
3) Удаление фоновой составляющей скользящим средним с окном 27 суток.
4) Выявление аномалий: $|\Delta foF2 - \mu| > 2\sigma$.
5) Классификация аномалий:
   - положительные/отрицательные,
   - буревые/небуревые по Dst ≤ -30 нТл.

2. Исходные данные

Станция	Период	Особенности
Калининград КФ ИЗМИРАН	1964-2024	аналоговые данные; с 2018 г. цифровой ионозонд «Парус-А»
Иркутск ИСЗФ СО РАН	1955-2023	аналоговые данные 1955-1996; цифровой DPS-4 с 2003 г.
Общие интервалы	41 год	1964-1989, 1991-1995, 2008-2023



Детрендированный ряд ΔfoF2 и точки аномалий за 2024 г. по данным КФ ИЗМИРАН

3. Основные результаты

Станция	Калининград	Иркутск
Всего аномалий	625	814
Буревые	425 (68%)	562 (69%)
Небуревые	200 (32%)	252 (31%)
Отрицательные	403 (64.5%)	489 (60%)
Положительные	222 (35.5%)	325 (40%)

Табл.1 Количество аномалий +/-, бур/небур для Калининграда и Иркутска

Ионозонд Калининград

Ионозонд Иркутск

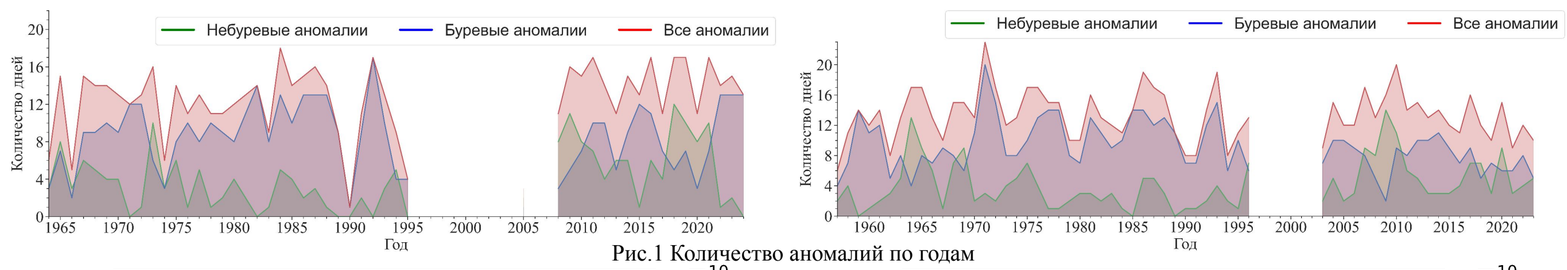


Рис.1 Количество аномалий по годам

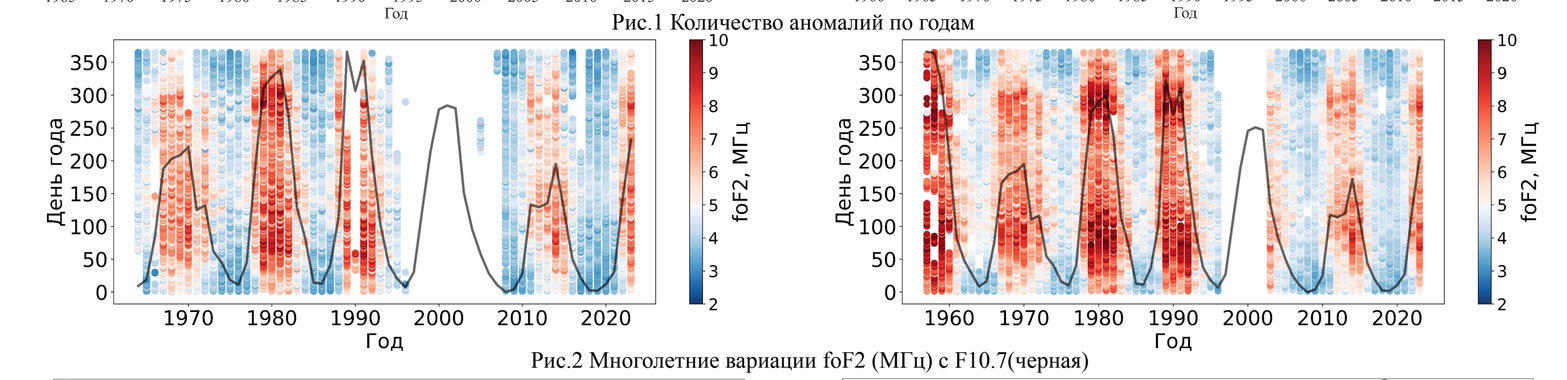


Рис.2 Многолетние вариации foF2 (МГц) с F10.7(черная)

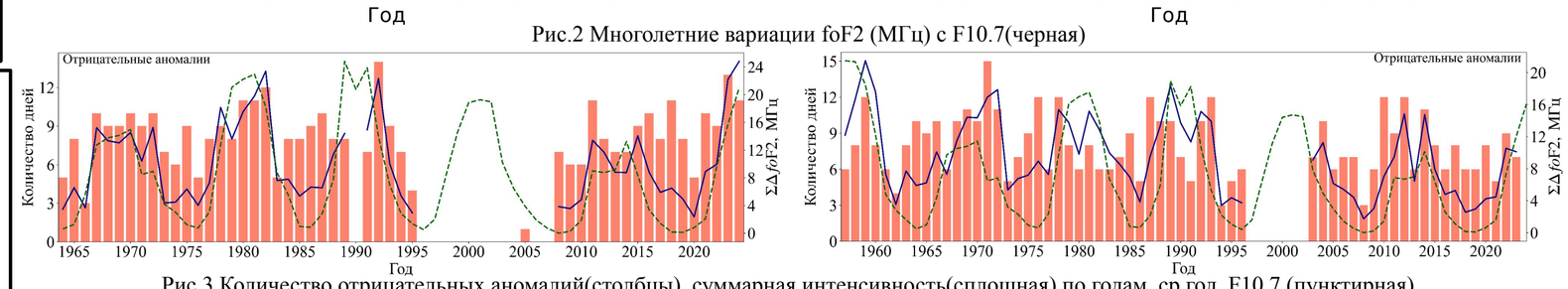


Рис.3 Количество отрицательных аномалий(столбцы), суммарная интенсивность(сплошная) по годам, ср.год. F10.7 (пунктирная)

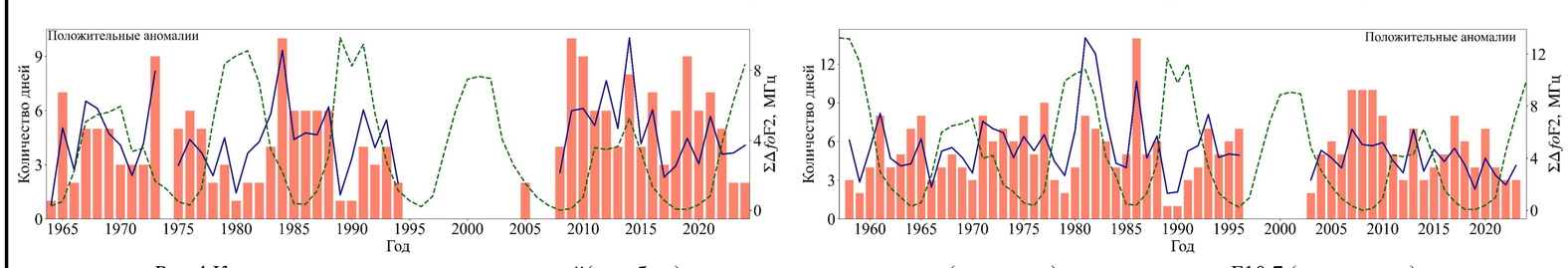


Рис.4 Количество положительных аномалий(столбцы), суммарная интенсивность(сплошная) по годам, ср.год. F10.7 (пунктирная)

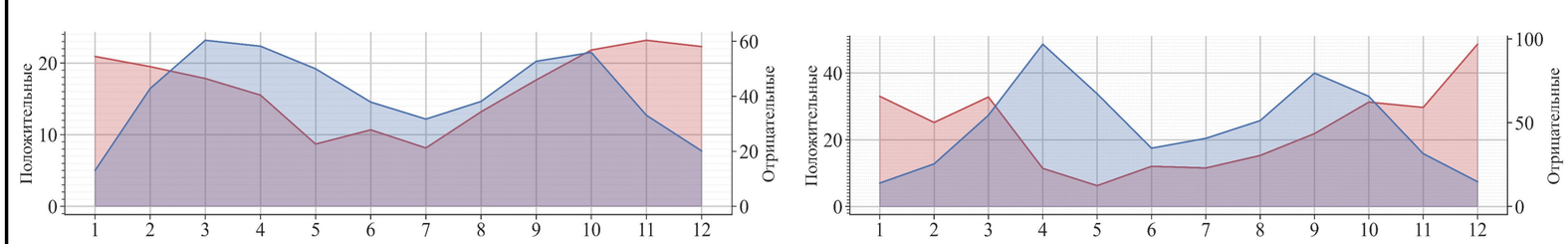


Рис.5 Сезонные вариации интенсивности положительных(красный) и отрицательных(синий) аномалий

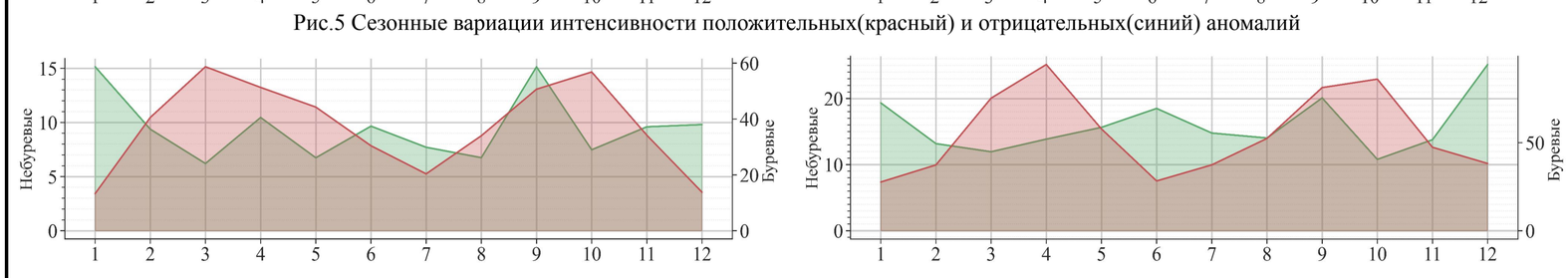


Рис.6 Сезонные вариации интенсивности буревых(красный) и небуревых(зеленый) аномалий

4. Сравнение рядов foF2 обсерваторий Калининграда и Иркутска

По данным табл. 1, доля буревых аномалий в Калининграде и Иркутске практически совпадает: 68% и 69%, что указывает на значимую роль геомагнитной активности. При этом в обоих регионах преобладают отрицательные аномалии: 64,5% в Калининграде и 60% в Иркутске.

Как видно из рис. 1, многолетняя изменчивость числа аномалий на двух станциях имеет сходный характер, хотя часть событий относится к небуревым аномалиям. Это показывает, что отклонения foF2 могут быть связаны не только с геомагнитными бурями, но и с другими ионосферными процессами.

Многолетние вариации foF2 (рис. 2) отражают связь с 11-летним циклом солнечной активности. Для Иркутска дополнительно характерна более высокая амплитуда сезонных вариаций, особенно в годы высокого F10.7.

Наиболее выраженная связь с солнечной активностью наблюдается для отрицательных аномалий (рис. 3). Их суммарная интенсивность лучше согласуется с изменчивостью индекса F10.7. Для положительных аномалий (рис. 4) эта связь менее устойчива.

Сезонное распределение показывает, что отрицательные аномалии чаще наблюдаются в периоды равноденствий, а положительные - зимой (рис. 5). Буревые аномалии имеют близкую сезонную структуру к отрицательным (рис. 6), поскольку среди них преобладают отрицательные отклонения foF2. У небуревых аномалий сезонная структура менее устойчива, что указывает на их более разнообразную природу, не всегда связанную с геомагнитной активностью.

5. Выводы

Несмотря на значительное удаление станций, сходство между Калининградом и Иркутском в характере аномалий критической частоты слоя F2 (foF2) явно преобладает над различиями. В обеих обсерваториях выявлено преобладание отрицательных аномалий и близкая доля событий, связанных с геомагнитными возмущениями. Это подтверждает, что геомагнитная активность является одним из основных факторов формирования сильных отклонений foF2.

Сезонное распределение аномалий имеет сходный характер: отрицательные и буревые аномалии чаще наблюдаются вблизи равноденствий, тогда как положительные аномалии более характерны для зимнего периода. Имеющиеся различия - например, в контрастности сезонного хода, сезонной структуры положительных/небуревых аномалий, обусловлены региональными геофизическими условиями, а также разной структурой и протяженностью рядов наблюдений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10004